

## مقایسه‌ی مدل‌های AERMOD و CALPUFF در مدل‌سازی انتشار آلودگی جوی CO (مطالعه‌ی موردی: کارخانه‌ی فولاد)

مارال رشیدی فرد<sup>۱</sup>، یوسف رشیدی<sup>۲\*</sup>، مجید امیری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فن آوری‌های محیط زیست، پژوهشکده‌ی علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
۲- نویسنده‌ی مسئول، استادیار، گروه فن آوری‌های محیط زیست، پژوهشکده‌ی علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[y\\_rashidi@yahoo.com](mailto:y_rashidi@yahoo.com)

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده‌ی محیط زیست و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱

### چکیده

امروزه آلودگی هوا در استان‌های بزرگ که به علت رشد صنایع به وجود آمده است به‌عنوان یکی از چالش‌های عمده درآمده است، با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین کانون‌های انتشار نقطه‌ای آلودگی در استان اصفهان مجتمع فولاد می‌باشد. لذا در این تحقیق با توجه به اهمیت و نقش مجتمع فولاد مبارکه به‌عنوان بزرگ‌ترین مجتمع فولاد در کشور، ابتدا میزان انتشار آلاینده‌ی CO از دودکش‌ها و فلرها تعیین و سپس نحوه پراکنش آن‌ها در منطقه شناسایی شده است. در این تحقیق از مدل AERMOD و CALPUFF به‌عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل انتشار CO خروجی از دودکش‌ها و فلرهای مجتمع فولاد مبارکه واقع در منطقه مبارکه‌ی استان اصفهان استفاده شده است. در این مقاله ابتدا میزان انتشار CO خروجی از دودکش‌های مجتمع فولاد، به‌وسیله اندازه‌گیری میدانی در چهارفصل سال ۲۰۱۶ تعیین گردید. سپس نحوه پراکنش این آلاینده‌ها با استفاده از مدل پراکنشی AERMOD و CALPUFF در منطقه‌ای به مساحت ۵۰×۵۰ کیلومترمربعی در هریک از دو جهت X و Y در دوره آماری یک‌ساله ۲۰۱۶ برای متوسط‌های زمانی ۱، ۳، ۸ و ۲۴ ساعته بررسی گردید و مقادیر حاصل از اجرای مدل با نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی در ۹ ایستگاه دریافت‌کننده به‌عنوان پذیرنده‌های مجزا در مدل مقایسه گردید. در مجموع با توجه به ارزیابی پیش‌بینی‌های صورت گرفته، در مقایسه‌های مختلف و مطالعات آماری در این تحقیق، عملکرد کلی مدل AERMOD در این محدوده مطالعاتی برتر از مدل CALPUFF بود. ولی به‌طورکلی می‌توان عملکرد هر دو مدل را در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در منطقه موردنظر قابل قبول دانست.

### کلمات کلیدی

CO، مدل AERMOD، مدل CALPUFF، مجتمع فولاد

### ۱- مقدمه

فقدان اطلاعات از نحوه پراکنش آلاینده‌ها باعث می‌شود، تعیین تأثیر انتشار آن‌ها بر خارج از مرزهای سایت و در مناطق مسکونی اطراف دشوار باشد (Shin et al, 2005). مجتمع فولاد مبارکه-ی اصفهان در ایران نیز به دلیل تولید میزان زیادی PM<sub>10</sub> و CO، کانون توجه بسیاری از متخصصین علوم محیط‌زیست را

چگونگی ورود آلاینده‌ها و همچنین سرعت آزادسازی آلاینده‌ها به اتمسفر بر آلودگی هوا تأثیر دارد. آلاینده‌ها ممکن است به‌طور متناوب یا پیوسته یا دوره‌ای آزاد شوند یا از یک منبع یا از چندین منبع یا از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آزاد شوند. همچنین پراکندگی آلاینده‌ها به طریقه ورود آن‌ها به اتمسفر بستگی دارد.

به خود جلب کرده است. در صورت وجود مقادیری از گاز دی-اکسید گوگرد در اتمسفر ریزگردهای موجود در هوا با  $PM_{10}$  واکنش داده و تبدیل به مواد سمی و خطرناک می‌شوند به طوری که یکی از عوامل اصلی مشکلات کیفیت هوای شهری در استان مبارکه‌ی اصفهان می‌باشد (Sadiqi et al, 2015). مدل CALPUFF توسط USEPA به عنوان یک مدل مناسب جهت مدل‌سازی جریان‌های غیریکنواخت و پیچیده از جمله حالت‌هایی که عوارض پیچیده زمین وجود دارد و همچنین در مکان‌هایی که جریان ساکن و جریان بازگشتی اهمیت دارد مورد تأیید قرار گرفته است (Rood, 2014). سیستم مدل‌سازی شامل سه قسمت اصلی: CALMET، CALPUFF و CALPOST می‌باشد. CALMET: یک مدل هواشناسی فرایابی می‌باشد که داده‌های هواشناسی در مقیاس میانی را از مدل‌های هواشناسی پیش‌یابنده گرفته و با استفاده از داده‌های عوارض زمین و کاربری زمین در شبکه‌بندی‌های دقیق‌تر، مقادیر را برای مقیاس‌های ریزتر محاسبه می‌کند. CALPUFF: در واقع یک مدل غیریکنواخت لاگرانژی-گوسی حرکت سیال است که زیر روال‌هایی برای شبکه‌بندی تغییرات زمان، شرایط هواشناسی در سه بعد، اثرات عوارض زمین، نشست‌های تر و خشک، اندرکنش پلوم دود و عوارض زمین، پخش و پراکنش بر روی محیط دریا، جریانات در پایین دست ساختمان‌ها را دارا می‌باشد. CALPOST: از این قسمت جهت پیش‌پردازش نتایج خروجی و پروسه کردن فایل‌های شبیه‌سازی استفاده می‌شود (USEPA(A), 2004). AERMOD یک مدل پلوم گوسی برای حالت پایدار و برای موارد نزدیک به سایت است که بر مبنای ساختار و مفاهیم تلاطم لایه‌مرزی سیارهای استوار می‌باشد. این مدل علاوه بر پردازشگر اصلی AERMOD از یک پیش‌پردازنده هواشناسی بنام AERMET و یک پیش‌پردازنده‌ی زمین زیست می‌باشد و آلودگی هوا یکی از چالش‌های پیش‌رو این منطقه صنعتی به شمار می‌رود. (USEPA(B), 2004). از این رو کنترل و کاهش هرچه بهتر و مؤثرتر آلاینده‌های هوا در سرلوحه برنامه‌های سازمان‌های ذی‌ربط قرار گرفته است. نخستین گام در نیل به این هدف تعیین میزان انتشار و شناسایی نحوه پراکنش آلاینده‌ها در منطقه می‌باشد. یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های در مناطق اطراف مجتمع فولاد مبارکه‌ی اصفهان، انتشار CO می‌باشد. در این تحقیق میزان انتشار CO از مجتمع فولاد واقع در فولاد مبارکه‌ی اصفهان به وسیله دو مدل انتشار اتمسفری متداول AERMOD و CALPUFF برآورد شده است.

به طور کلی، ارزیابی‌های محدودی در مقایسه دو مدل CALPUFF و AERMOD انجام شده است. از جمله

دیمیتری تارتاکوسکی و همکاران در سال ۲۰۱۳، میزان انتشار ذرات از یک معدن واقع در زمین پر از تپه را به وسیله دو مدل انتشار اتمسفری AERMOD و CALPUFF بررسی کردند. برای طیف گسترده‌ای از شرایط آب‌وهوا و توپوگرافی در محدوده مورد مطالعه، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل AERMOD در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری بهتر از نتایج به دست آمده توسط مدل CALPUFF بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از نرم‌افزار AERMOD هنگامی که اطلاعات توپوگرافی دیجیتال در دسترس باشد غیرضروری است (Cimorelli, et al, 2004). در سر و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ مقادیر انتشار NO خروجی از دودکش‌های دو نیروگاه با سوخت زغال‌سنگ را بیش از ۱ سال در ۸ ایستگاه پذیرنده جمع‌آوری کردند. سپس نتایج اندازه‌گیری میدانی را با نتایج مدل CALPUFF برتر از AERMOD شناخته شد. این مشاهدات نشان می‌دهند که به طور کلی که هر دو مدل به نتایج یکسانی دست یافته‌اند (Tartakovsky et al, 2013). به طور کلی باید تأکید کرد که ارزیابی و مقایسه به AERMOD و CALPUFF برای مجتمع فولاد، به ویژه برای شرایط زمین پیچیده؛ هرگز انجام نشده است. از این رو در این مطالعه برای اولین بار عملکرد هر دو مدل AERMOD و CALPUFF را در چنین شرایطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق برآورد عملکرد مدل‌ها به دو صورت انجام شده است: ابتدا توسط مقایسه داده‌های مشاهداتی خروجی مدل‌ها، در نقاط گیرنده تعیین شده برای مدل‌ها (براساس مختصات UTM) صحت مدل‌سازی در هر نقطه در دوره‌های زمانی مورد نظر به دست آمده است در مرحله دوم، میزان صحت عملکرد مدل‌ها در مقایسه با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معرفی منطقه

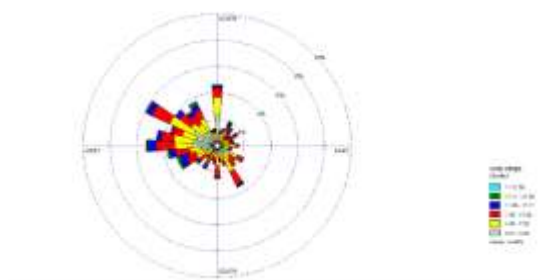
فاصله خطی اراضی کارخانه‌ی فولاد مبارکه‌ی اصفهان شهر مبارکه ۱۰ کیلومتر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت اراضی طرح نسبت به مناطق مسکونی اطراف را نشان می‌دهد.

اصفهان که نزدیکترین ایستگاهها به محدوده مطالعاتی موردنظر میباشند. استفاده شده است و در مطالعات ارائه شده است.

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده هواشناسی و توپوگرافی

مدت زمان داده	اطلاعات استخراج شده	نوع داده	داده‌های مورد بررسی
۲۰۱۶-۲۰۱۷	بررسی کلی جریان باد منطقه، دمای هوا، رطوبت نسبی، گلباد منطقه	هواشناسی سینوپتیک	داده‌های هواشناسی سینوپتیک
۲۰۱۶-۲۰۱۷	بررسی کلی جریان باد منطقه، دمای هوا، رطوبت نسبی، گلباد منطقه	هواشناسی جو بالا	داده‌های هواشناسی جو بالا

با توجه به اطلاعات هواشناسی و گلباد منطقه جهت باد غالب غربی و حداقل سرعت باد با سرعت  $4 - 3.5$  m/s می‌باشد. شکل ۲ گلباد منطقه را در سال ۲۰۱۶-۲۰۱۷ نشان می‌دهد.



شکل ۲- گلباد سالانه منطقه مورد بررسی

به طور قطع یکی از اصلی ترین پارامترهای مؤثر در بحث مدل سازی و پیش بینی آلودگی هوا که بیش از هر پارامتر دیگری میزان دقت آن بر صحت پیش بینی تأثیرگذار است، داده‌های توپوگرافی و عوارض زمین است. منبع اطلاعاتی AERMAP فایل‌های دیجیتالی ارتفاع ناهمواری‌ها (DEM) می‌باشد که توسط برخی مؤسسات توسط عکس‌های ماهواره‌ای ایجاد می‌شوند و در این تحقیقی از اطلاعات سازمان نقشه برداری ایران



شکل ۱- موقعیت اراضی فولاد مبارکه به مناطق مسکونی

منابع آلاینده در مجتمع فولاد مبارکه‌ی سپاهان ناشی از گازهای خروجی از دودکش‌های قوس الکتریکی و نورد گرم می‌باشد. به‌طور کلی داده‌های مورد نیاز جهت انجام این تحقیق را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم بندی کرد. داده‌های مورد نیاز جهت مدل سازی اتمسفریک، داده‌های مورد نیاز جهت مدل سازی پخش و پراکنش آلودگی هوا شامل ورودی‌های مدل‌های CALPUFF AERMOD و داده‌های اندازه گیری شده غلظت که جهت صحت سنجی مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته است (Dresser and Huizer, 2011). در نهایت مقدار غلظت و نحوه انتشار CO در منطقه توسط دو مدل AERMOD و CALPUFF مدل سازی و پیش بینی گردیده و محدوده‌های سالم و ناسالم در منطقه با توجه به میزان غلظت ماکزیم تعیین شده و نتایج دو مدل با یکدیگر و نیز با نتایج اندازه گیری‌های میدانی با استفاده از روابط آماری، صحبت سنجی شده است (IRIMO. 2013).

## ۲-۲- اطلاعات ورودی مدل

جهت عملکرد مطلوب مدل به‌طور معمول در هر ۱۰ کیلومترمربع (به شرط عدم وجود تغییرات عمده در عوارض طبیعی) یک ایستگاه هواشناسی مورد نیاز است- ولی وجود عوارض عمده طبیعی نظیر کوه، جنگل، رودخانه و غیره باعث می‌شود این فاصله کاهش یابد (EMC. 1997). در این تحقیق داده‌های جو بالا و ایستگاه هواشناسی سینوپتیک نیز از طریق سازمان هواشناسی کشور ایران، به منظور بررسی مطالعات اولیه شرایط جوی منطقه و همچنین تهیه داده‌های جدول ۱ پارامترهای مؤثر بر کیفیت هوای محدوده‌ی ورودی مدل هواشناسی CALMET و AERMET مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های هواشناسی سطحی مورد نیاز، از داده‌های ثبت و کنترل کیفی شده در سال ۲۰۱۶ - ۲۰۱۷ سازمان هواشناسی کشور برای ایستگاه فرودگاه اصفهان و داده‌های هواشناسی جو بالا نیز از ایستگاه هواشناسی

لایه‌مرزی، رطوبت نسبی در یک منطقه در فصول مختلف بر روی جهت انتشار توده آلاینده (plume) اثر قابل توجه خواهد داشت و آلودگی هوا را تحت تأثیر قرار خواهند داد، لذا به شده است. جهت پوشش تمامی منابع در دامنه مطالعات مدل‌سازی و مرکزیت دادن به منبع موردنظر، همچنین در برگرفتن محدوده نیز دارا باشد، پذیرنده‌ها در دو سیستم شبکه‌ای لیل مجزا به مدل معرفی شده‌اند. پذیرنده‌های شبکه‌ای در مختصات کارترین و در محدوده به ترتیب با مساحت‌های ۵۰×۵۰ کیلومترمربعی، در هریک از دو جهت X و Y تعریف شده‌اند و موقعیت ایستگاه‌های پایش موردنظر، به‌عنوان پذیرنده‌های مجزا در مدل معرفی گردیده‌اند. چیدمان همه پذیرنده‌ها به مرکزیت یک دودکشی در میان قسمت‌های تولیدی کارخانه به‌گونه‌ای انتخاب شده است تا تمامی منابع را پوشش داده و قابلیت بیان پدیده‌های جوی در مقیاس میانی و خرد و همچنین اثرات توپوگرافی و کاربری اراضی را در خود داشته باشد (Abril, 2015). موقعیت قرارگیری ایستگاه‌های پایش و زمان نمونه‌برداری در جدول ۲ آورده شده است.

به‌عنوان داده‌های ورودی این پیش پردازنده استفاده شده است. داده‌ها به فرمت X Y Z تبدیل شده‌اند که می‌تواند توسط AERMAP خوانده شود. خروجی این پیش پردازنده شامل مختصات هر گیرنده و ارتفاع آن از سطح دریا و ارتفاع ناهمواری در محل گیرنده و مختصات جغرافیایی منبع است. این پیش پردازنده برای یک منطقه، فقط کافی است که یک‌بار اجرا شود (Sanin and Montero, 2007). از آنجائی که فایل DEM نمی‌تواند به‌عنوان ورودی CALPUFF استفاده شود، برای فراهم آوردن داده‌های عوارض آنجائی که فایل DEM نمی‌تواند به‌عنوان ورودی CALPUFF استفاده شود، برای فراهم آوردن داده‌های عوارض طبیعی CAL PUFF از داده‌های جهانی موجود به‌صورت فایل توپوگرافی ۳۲ SRTM با دقت ۹۰ متر و GTOPO با تفکیک ۹۰۰ متر استفاده شده است. همچنین برای داده‌های کاربری زمین از فایل GLCC با دقت مکانی ۱ کیلومتر استفاده شده است. SRTM یک پروژه بین‌المللی به رهبری -National sa La Ulas. (NGA) Geospatial- Intelligence Agency هوانوردی و فضایی (NASA) می‌باشد. SRTM شامل یک سیستم رادار مخصوص می‌باشد که در طول مأموریت ۱۱ روزه خود در فوریه سال ۲۰۰۰ بر پردازنده شاتل فضایی Endeavour شده بود و داده‌های ارتفاع زمین را در مقیاس near-global ارائه داد؛ بنابراین SRTM در حال حاضر یکی از کامل‌ترین پایگاه داده‌های توپوگرافی زمین به‌صورت دیجیتال با وضوح بالا است (S. Rood, 2014). در شکل ۳ نقشه عوارض زمین در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار AERMOD نمایش داده شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده وضعیت طبقات ارتفاعی منطقه می‌باشد.



شکل ۳- نقشه عوارض زمین در ابعاد ۵۰\*۵۰ کیلومتر مربع خروجی مدل AERMOD

تغییرات فصلی بر روی انتقال آلاینده‌ها، به‌ویژه تغییرات پارامترهای جوی مانند اندازه و جهت باد، دمای هوا، ارتفاع

جدول ۲- زمان نمونه برداری از ایستگاه‌های محیطی و موقعیت نقاط در نمونه برداری

ایستگاه	X Coordinate	Y Coordinate	زمان نمونه برداری
A	۵۳۵۹۸۸،۹	۳۵۶۴۸۳۶،۳	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
B	۵۴۰۵۵۲،۶۹	۳۵۷۳۱۳۲،۶۳	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
C	۵۳۷۹۶۳،۶۹	۳۵۶۹۸۸۵،۱۸	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
D	۵۳۷۷۳۴،۲	۳۵۶۸۵۸۴،۵۵	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
E	۵۳۶۷۳۹،۹۱	۳۵۶۷۳۹۹،۱	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
F	۵۳۷۹۶۳،۵۹	۳۵۶۹۸۸۵،۱۸	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
G	۵۳۷۸۴۶،۵۴	۳۵۶۶۴۰۰،۴۲	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
H	۵۴۰۵۲۲،۱۴	۳۵۶۵۰۸۳،۴۴	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان
I	۵۴۲۲۲۰،۸۲	۳۵۶۵۸۶۴،۸	فصل‌های بهار، تابستان، پاییز، زمستان

در این مطالعه، ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی توسط دو مدل AERMOD و CALPUFF با مقادیر اندازه‌گیری‌های میدانی، برای پذیرنده‌های موردنظر، با استفاده از پارامترهای آماری پیشنهادی سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا انجام شده است که این پارامترها عبارت‌اند از:

### ۲-۳-۱- ضریب همبستگی (CCOF)

پارامتر CCOF، مطابق رابطه (۱)، ارتباط بین نتایج خروجی مدل و داده‌های اندازه‌گیری میدانی را نشان می‌دهد و هرچقدر مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وضعیت مطلوب دقت نتایج مدل می‌باشد.

$$CCOF = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left( \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left( \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

### ۲-۳-۲- اریبی کسری (Fractional Bias)

در این تحقیق بر اساس چهارچوب ارائه‌شده توسط اولسن عملکرد آماری نتایج توسط پارامترهای اریبی کسری (Fractional Bias) بیانگر تمایل مدل به پیش‌بینی بیش‌از حد و یا کمتر از حد واقعی می‌باشد، بیان می‌شود. مقدار اریبی کسری ۰،۱۷ معادل پیش‌بینی بیشتر (overprediction) با (underprediction) ضریب ۲ و ۰،۱۷ معادل پیش‌بینی کمتر ضریب ۲ می‌باشد و اریبی کسری صفر به‌طور متوسط نشان‌دهنده این است که پیش‌بینی مدل کامل است. یک اجرای مدل خوب باید اریبی کسری کمتر از ۰،۳ داشته باشد (Olesen, 2001).

$$FB = \frac{\overline{(Y_i - X_i)}}{0.5 * (\overline{Y_i} + \overline{X_i})} \quad (2)$$

$X_i$ : داده‌های خروجی مدل،  $Y_i$ : داده‌های میدانی (پایش)،  $\bar{X}_i$ : میانگین داده‌های خروجی مدل،  $\bar{Y}_i$ : میانگین داده‌های میدانی، N تعداد نمونه‌ها باشد.

### ۳-نتایج

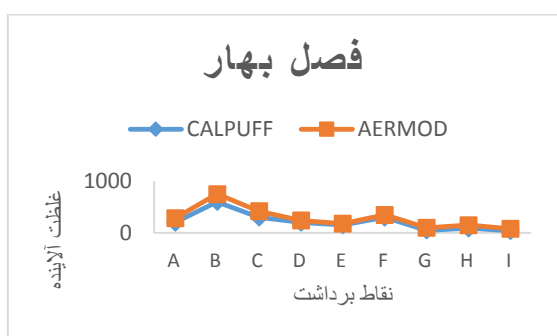
در این تحقیق ابتدا ویژگی‌های هر یک از دو مدل CALPUFF و AERMOD مورد بررسی قرار گرفته است و سپس با توجه به اینکه مدل CALPUFF برای بازه‌های بزرگ (بیشتر از ۵۰ کیلومتر) و مدل AERMOD برای بازه‌های کوچک‌تر پیشنهاد شده‌اند، لذا برای مقایسه بهتر منطقه‌ای به ابعاد ۵۰ در ۵۰

پس از بررسی فرآیند تولید و تعیین منابع انتشار طی بازدیدهای میدانی از منطقه، سنجش CO خروجی از دودکش‌های در حال کار، در دو ماه در سال ۲۰۱۵ و در هر ماه ۳ نوبت توسط دستگاه Testo XL 350 در نقاط مخصوص نمونه‌برداری از دودکش‌ها، اندازه‌گیری شده است. با توجه به اینکه ضرایب انتشار میزان تولید و انتشار آلاینده‌ها را در شرایط عملکرد نرمال یک فرآیند نشان می‌دهد، فقط در شرایط کارکرد طبیعی سیستم نمونه گرفته شد و از نمونه‌برداری در شرایط غیر نرمال از قبیل تعمیرات یا تأثیر قرار می‌دهند، خودداری شد (EMC, 1997).

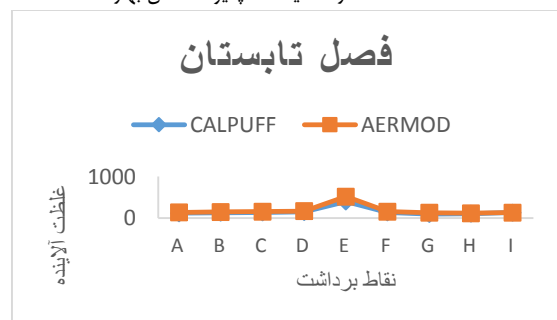
### ۲-۳- صحت سنجی مدل

به‌منظور صحت سنجی نتایج خروجی مدل نیز، نمونه‌برداری گازهای آلاینده‌ی محیطی نیز در ۱۳ پذیرنده توسط دستگاه LSI Satem Babuc که دارای سنسورهای الکتروشیمیایی قابل تعویض و ساخت کشور ایتالیا بوده، انجام شد. صحت سنجی مدل

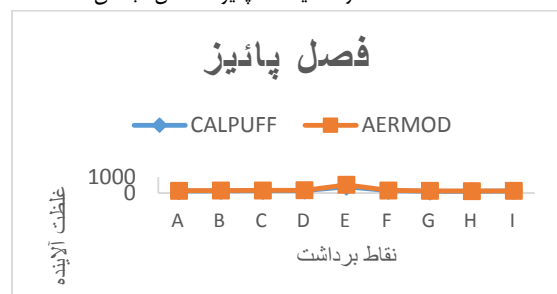
غلظت شبیه‌سازی شده CO در مقایسه با بیشترین مقدار غلظت اندازه‌گیری شده، بزرگ‌تر و در مقایسه با کمترین میزان غلظت اندازه‌گیری شده، کوچک‌تر می‌باشد. ولی در مقایسه با مقادیر میدانی، هر دو مدل توافق خوبی نشان دادند. همچنین میزان خروجی‌های مدل CALPUFF با مقادیر اندازه‌گیری شده، مناسب‌تر بوده است. مقدار متوسط اریبی کسری (FB) برای آلاینده CO برای مدل AERMOD و CALPUFF به ترتیب ۰,۳۶ و ۰,۲۴ می‌باشد. مقادیر FB نشان می‌دهد که CALPUFF پیش‌بینی نسبتاً دقیق‌تری را انجام می‌دهد. مقدار متوسط CCOF نیز برای مدل AERMOD و CALPUFF به ترتیب ۰,۸۲ و ۰,۰۸ می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از اجرای دو مدل CALPUFF و AERMOD در ۱۳ ایستگاه پذیرنده فصل بهار



شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از اجرای دو مدل CALPUFF و AERMOD در ۱۳ ایستگاه پذیرنده فصل تابستان



شکل ۵- مقایسه نتایج حاصل از اجرای دو مدل CALPUFF و AERMOD در ۱۳ ایستگاه پذیرنده فصل پاییز

کیلومتر مربع تعیین و سپس داده‌های غلظت خروجی این دو برنامه با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

بررسی عملکرد مدل پراکندگی همیشه با مقایسه خروجی مدل با اندازه‌گیری‌های انجام شده امکان‌پذیر می‌باشد. لذا در این مطالعه، نتایج محاسبات مدل AERMOD با مقادیر اندازه‌گیری برای حداکثر غلظت متوسط ۱ ساعته در ۱۳ پذیرنده مقایسه شده است. پارامترهای آماری CCOF و FB در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. مقادیر ضریب همبستگی برای آلاینده CO برای فصل بهار ۰,۸۵، فصل تابستان ۰,۸۴، فصل پاییز ۰,۷۵، فصل زمستان ۰,۸۳ می‌باشد.

جدول ۳- صحت سنجی مدل AERMOD

پارامترهای آماری	بهار	تابستان	پائیز	زمستان
CCOF	۰,۸۵	۰,۸۴	۰,۷۵	۰,۸۳
FB	۰,۴۵	۰,۳۲	۰,۳۲	۰,۳۶

پارامترهای آماری CCOF، FB برای صحت سنجی مدل CALPUFF در آلاینده‌ی CO برای فصل بهار ۰,۵۶ فصل تابستان ۰,۸۳ فصل پاییز ۰,۶۷ و زمستان ۰,۸۲ می‌باشد. در مجموع نتایج مدل با پارامتر ضریب اریبی برای آلاینده‌ی CO در فصل بهار ۰,۲۵، در فصل تابستان ۰,۲۱، فصل پاییز ۰,۰۲، فصل زمستان ۰,۳۲ و در واقع کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده‌اند. ماکزیمم میزان پراکندگی CO در فصل-های پاییز و زمستان می‌باشد. جدول ۴ نشان‌دهنده‌ی ضریب همبستگی برای میانگین داده‌های خروجی بر اساس مدل CALPUFF است.

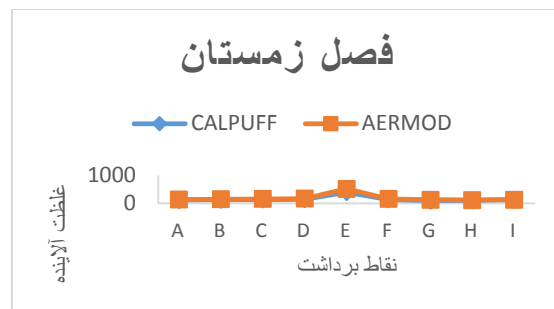
جدول ۴- صحت سنجی مدل CALPUFF

پارامترهای آماری	بهار	تابستان	پائیز	زمستان
CCOF	۰,۵۶	۰,۸۳	۰,۶۵	۰,۸۲
FB	۰,۲۵	۰,۲۱	۰,۲	۰,۳۲

## ۴- بحث

از آنجائی که منبع اصلی این آلاینده قسمت قوس الکتریکی و ذوب فولاد می‌باشد، دلیل افزایش غلظت آلاینده‌ها ممکن است در پی فعالیت بیشتر این تأسیسات در فصول سرد باشد. علاوه بر این وجود بادهای آرام که باعث کاهش اتلاف مؤثر آلاینده‌های هوا می‌شود در فصل پاییز و زمستان بیشتر از فصل تابستان اتفاق می‌افتد. با در نظر گرفتن این عوامل، مدل استفاده‌شده، نتایج منطقی و رضایت بخشی را برای انتشار CO نشان داده است. به‌طور کلی، بررسی شکل ۳ الی شکل ۱ نشان می‌دهد میزان

خروجی مختلف با به‌طور لاگرانژ (CALPUFF) بودند. CALPUFF به طرز چشمگیری مقادیر بیشتری را برای یک دوره متوسط مثلاً یک‌ساعته در نقاط پذیرنده نسبت به AERMOD محاسبه می‌کند. خروجی‌های پژوهش حاضر در مقایسه با تحقیق Jitra و همکاران (۲۰۱۵) با موضوع روش‌های پخش آلودگی دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن در تایلند با استفاده از مدل‌های CALPUFF و AERMOD، با وجود ویژگی‌های سطحی و اقلیمی متفاوت در دو منطقه، الگوی پراکنش در این تحقیق به‌مراتب دارای دقت بیشتری می‌باشد بر طبق نتایج حاصل از مدل‌سازی آن‌ها به‌طور کلی استفاده از مدل AERMOD نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل CALPUFF برای میزان پراکنش و غلظت آلاینده‌های  $NO_x$  و  $SO_2$  دارند زیرا در مقادیر بالایی از تولید آلاینده‌های مدل AERMOD دارای دقت بالایی در برخورد با حجم زیادی از آلودگی نسبت به CALPUFF دارد (Jitra N, 2015). با توجه به نتایج حاصل می‌توان به‌منظور مدیریت و کنترل کیفیت هوا، به‌عنوان مثال توسعه استراتژی کنترل و ارزیابی ظرفیت انتقال آلاینده‌ها در منطقه میزان و نحوه انتشار این آلاینده‌ها در منطقه باید مدنظر قرار گیرد.



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از اجرای دو مدل CALPUFF و AERMOD در ۱۳ ایستگاه پذیرنده فصل زمستان

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا مطالعات و بررسی‌هایی در ارتباط با نحوه عملکرد مدل‌های CALPUFF و AERMOD، تعیین محدودیت‌ها و قابلیت‌های هر دو مدل انجام شد. سپس کلیه اطلاعات در رابطه با مقادیر اندازه‌گیری شده فصلی آلاینده بالا و پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی استان اصفهان گردآوری و اطلاعات موردنیاز جهت اجرای مدل‌های CALPUFF و AERMOD تهیه گردید. سپس با استفاده از بانک اطلاعاتی، شامل پارامترهای هواشناسی، توپوگرافی، فهرست منابع انتشار و غلظت آلاینده  $NO$ ، ابتدا مدل AERMOD و پس از آن مدل CALPUFF برای چهارفصل سال ۲۰۱۶ میلادی اجرا گردید. به‌منظور صحت‌سنجی و تعیین درست‌یابی مدل‌ها (Verification)، نتایج حاصل از اجرای مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های سنجش محیطی مقایسه گردید و با استفاده از سری روابط آماری، مورد ارزیابی واقع گردید. به‌طور کلی می‌توان گفت محاسبه و تعیین دقیق سهم گامی اساسی جهت تصمیم‌گیری در ارتباط با برنامه‌های مدیریت آلودگی هوا به‌منظور جلوگیری از تخریب محیط زیست مطرح بوده است- در مقایسه‌های مختلف و اقدامات آماری در این مطالعه، عملکرد کلی CALPUFF در این محدوده‌ی مورد مطالعه AERMOD برتر CALPUFF از بود. مدل AERMOD ته‌نشست خشک یا تر گازها را در برنمی‌گیرد و فقط رفتار ساده ته‌نشست خشک را با استفاده از یک الگوریتم بازتاب در نظر می‌گیرد و به‌طور کلی پیش‌بینی AERMOD کمتر از حد واقعیت می‌باشد. بالا بودن میزان غلظت‌های اندازه‌گیری شده محیطی در مقایسه با مقادیر مدل‌سازی شده می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که نه تنها منابع انتشار نقطه‌ای مانند دودکش‌ها و فلرها در انتشار آلاینده‌ها در منطقه مؤثرند، بلکه منابع انتشار از صنایع مجاور و منابع متحرک مانند خودروها نیز می‌توانند در انتشار آلاینده‌های مورد نظر نقش داشته باشند. از نتایج مدل‌سازی روشن است که غلظت‌های

- Abril A; Diez S; (2015), Particulate matter concentrations originating from industrial and urban sources: Validation of atmospheric dispersion modeling results; Atmospheric Pollution Research xxx, 1e10.
- Cassiani, M, Stohl, A, Brioude, J, (2015), Lagrangian Stochastic Modelling of Dispersion in the Convective Boundary Layer with Skewed Turbulence Conditions and a Vertical Density Gradient: Formulation and Implementation in the FLEXPART Model, Boundary-Layer Meteorol, 154:367-390.
- Cimorelli AJ, Perry SG, Venkatram A, Weil JC, (2004). Paine RJ, Wilson RB, et al. AERMOD: Description of model formulation. North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency, Contract No.: EPA-454/R-03-004.
- Dresser AL, Huizer RD, (2011). CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited. Journal of the Air & Waste Management Association (1995) 64:7-59. PubMed. PMID: 21751581. Epub 2011/07/15. Eng.
- EMC. (1997), U. Conditional Test methods (CTM-030). Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide and Oxygen Emission from Natural Gas fired Engines, Boilers and Proceed Heaters using portable Analyzer.
- Jittra N, (2015) Nattaporn Pinthong and Sarawut Thepanondh; Performance Evaluation of AERMOD and CALPUFF Air Dispersion Models in Industrial Complex Area; Air, Soil and Water PP87-95.
- IRIMO. (2013), National Centre of Climatology. Islamic Republic of Iran Meteorological Organization Downscaling report.
- Olesen HR, (2001), editor Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Belgirate. Ten years of harmonization activities: past, present, and future; Roskilde, Denmark: National Environmental Research Institute.
- Rood. A, (2014), Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset, Atmospheric Environment 89, 707-720.
- Sanin, G. Montero, (2007) "A finite difference model for air pollution simulation" Advances in Engineering Software 38, 358-365.
- Shin U, Ucan O, Bayat C, Ozturun N. (2005) Modeling of SO<sub>2</sub> distribution in Istanbul using artificial neural networks. Environ Model Assess. 1;10(2):135-42. English.
- Sadiqi aliyu, A, Termiziramli, A. Azizsaleh, M; 2015, Assessment of potential human health and environmental impacts of a nuclear power plant (NPP) based on atmospheric dispersion modeling; Atmósfera 28(1), 13-26.
- Tartakovsky D, Broday DM, Stern E. (2013). Evaluation of AERMOD and CALPUFF for predicting ambient concentrations of total suspended particulate matter (TSP) emissions from a quarry in complex terrain. Environmental Pollution. 138-45.
- S. Rood A, (2014), Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset, Atmospheric Environment 89, 707-720.



- USEPA. (A)(2004) , USER'S GUIDE FOR THE AMS/EPA REGULATORY MODEL-CALPUFF.  
North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring and Analysis Division  
Research Triangle Park, EPA-454/B-03-001, 216 pp.

- USEPA. (B) (2004), USER'S GUIDE FOR THE AMS/EPA REGULATORY MODEL-AERMOD.  
North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring and Analysis  
Division Research Triangle Park, EPA-454/B-03-001, 216 pp.